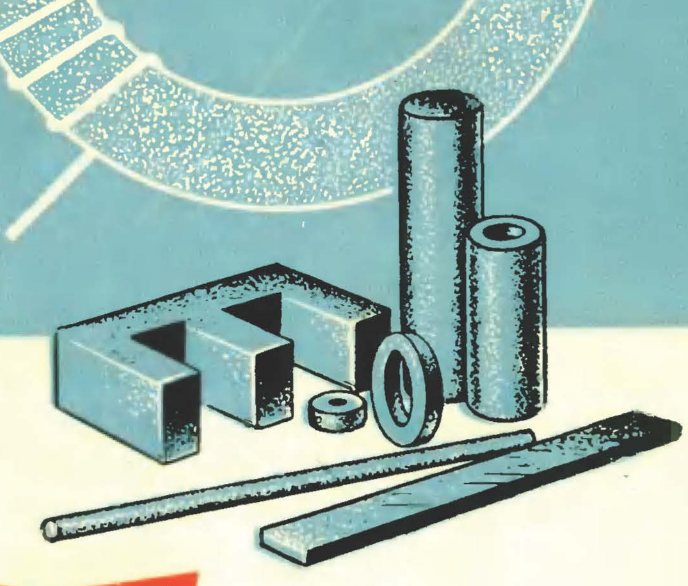
Г. А. Матвеев и В. И. Хомич

# КАТУШКИ С ФЕРРИТОВЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ






ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

*Выпуск 443*

Г. А. МАТВЕЕВ, В. И. ХОМИЧ

# КАТУШКИ С ФЕРРИТОВЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

*PAVEL-49*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1962 ЛЕНИНГРАД

## СОДЕРЖАНИЕ

*В брошюре, рассчитанной на подготовленного читателя, кратко излагаются основные свойства магнитных материалов, применяемых для изготовления сердечников катушек индуктивности, даются рекомендации по выбору оптимальной формы сердечника, а также методика расчета типовых конструкций катушек индуктивности.*

*Приведены примеры применения катушек с новыми магнитными материалами в различных схемах.*

6Ф2.13 *Матвеев Георгий Александрович*

*Хомич Вадим Иванович*

М 33 Катушки с ферритовыми сердечниками.
М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
40 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека). Вып. 443.
6Ф2.13

* * *

Редактор *А. Ф. Сенченков* Техн. редактор *В. В. Емжин*
Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в набор 23/XII 1961 г. Подп. к печати 31/V 1962 г.
Т-08501 Бумага 84×108[1]/32. 2,05 печ. л. Уч.-изд. л. 2,4
Тираж 75 000 экз. Цена 10 коп. Зак. 892

1-я типография Профиздата. Москва, Крутицкий вал, 18.

## ВВЕДЕНИЕ

В послевоенные годы для нужд радиотехники были разработаны новые, большей частью синтетические материалы. К числу таких материалов относятся ферромагнетики — вещества с особыми магнитными свойствами, применение которых позволило уменьшить габариты и вес радиоаппаратуры. Помимо этого, использование ферромагнетиков позволяет улучшить электрические свойства некоторых элементов радиоаппаратуры, в частности катушек индуктивности на высоких частотах.

Особое место среди современных магнитных материалов принадлежит ферритам — сложным неметаллическим веществам на базе окислов железа. В настоящее время они являются основными магнитными материалами, применяемыми в контурных катушках индуктивности, трансформаторах, дросселях и т. п. Частотный диапазон катушек с ферритовыми сердечниками простирается от десятков килогерц до десятков мегагерц.

Успешное конструирование катушек индуктивности с ферритовыми сердечниками возможно при условии правильного выбора магнитного материала сердечника, для чего необходимо знать магнитные, электрические и механические свойства материала. Путем расчета можно определить обмоточные данные катушки (число витков и марку провода), стабильность ее параметров во времени и при изменении температуры, а также особенности работы катушки в различных режимах.

## ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Магнитное поле в пространстве характеризуется достаточно полно двумя величинами: напряженностью $H$ и индукцией $B$. Физический смысл понятия напряженность можно представить как значение «магнитного» заряда, отнесенное к единице поперечного сечения, т. е. как некоторое число элементарных магнитных (фиктивных) зарядов, приходящихся на единицу площади. Напряженность магнитного поля наиболее просто определяется в кольцевой катушке индуктивности (тороидальной катушке), по которой протекает постоянный ток. Внутри такой катушки магнитное поле практически однородно и напряженность его, измеряемая в эрстедах (*э*), выражается формулой

$$H=\frac{0{,}4\pi wI}{l_{ср}} (э),$$

где $I$ — ток, *а*;
$w$ — число витков;
$l_{ср}$ — длина средней магнитной силовой линии, *см*.

Под понятием «силовая линия» подразумеваются линии магнитных сил, отчетливо наблюдаемые по расположению железных опилок в поле постоянного магнита. Напряженность поля выражается, помимо эрстед, в ампер-витках.

Индукция магнитного поля характеризует силу, с которой поле воздействует на единичный магнитный заряд. Так же как и напряженность, она отнесена к единице площади сечения. Индукция магнитного поля, помимо интенсивности, определяет также и среду, в которой действует это поле. Она связана с напряженностью поля — магнитной проницаемостью $\mu$ — коэффициентом, указывающим влияние среды. Чем больше магнитная проницаемость среды, тем больше индукция, а следовательно, и общий магнитный поток, выражающийся произведением индукции на величину площади сечения.

Если вокруг проводника с током поместить ферритовое кольцо с большой магнитной проницаемостью, а магнитный поток в кольце определять с помощью флюксметра, то показания его будут больше, чем при отсутствии кольца, примерно в число раз, равное величине $\mu$. Индукция поля выражается в гауссах (*гс*).

Магнитная проницаемость большинства материалов практически равна единице, т. е. магнитной проницаемости вакуума. Вещества с большой магнитной проницаемостью называются ферромагнитными. К ним относятся железо, никель, кобальт и их сплавы, а также ферриты.

Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов непостоянна: она зависит от величины намагничивающего поля, температуры, а также от необратимых изменений свойств материала. Наиболее полно эти свойства проявляются в явлении гистерезиса, возникающем при перемагничивании ферромагнетика, например при воздействии на него переменного магнитного поля. Суть его заключается в неоднозначности изменений индукции при изменении напряженности поля. Иначе говоря, одному и тому же значению напряженности поля могут соответствовать (у одного и того же материала) разные значения индукции в зависимости от того, какой процесс происходит — увеличение или уменьшение напряженности поля. Кривые гистерезиса для различных ферромагнитных материалов приведены на рис. 1. Площадь петли гистерезиса пропорциональна магнитным потерям.

Помимо потерь на гистерезис, в понятие магнитные потери входят также потери на вихревые токи (токи Фуко) и на последействие (эффект отставания по фазе индукции от напряженности поля). Величина вихревых токов зависит от электропроводности ферромагнетика.

Ферриты, в частности, обладают весьма высоким удельным сопротивлением (от $10^2$ до $10^{10}$ *ом/см*), чем выгодно отличаются от других магнитных материалов. Магнитные потери материала оцениваются тангенсом угла потерь $tg\delta$, показывающим относительную величину мощности потерь в сердечнике катушки по сравнению с полезной мощностью (в данном случае реактивной).

Современные магнитные материалы делятся на три группы: металлические (железо и его сплавы); порошкообразные (магнитодиэлектрики); неметаллические сплавы (ферриты).



Металлические магнитные материалы в большинстве случаев применяются в сравнительно низком (звуковом) диапазоне частот. На более высоких частотах потери в металлических сердечниках резко возрастают, а магнитная проницаемость падает. Наиболее «высокочастотные» металлические ферромагнетики — пермаллой с толщиной ленты до 0,01 *мм* — применяются на частотах до десятков килогерц. Преимуществом лучших сортов металлических ферромаг-

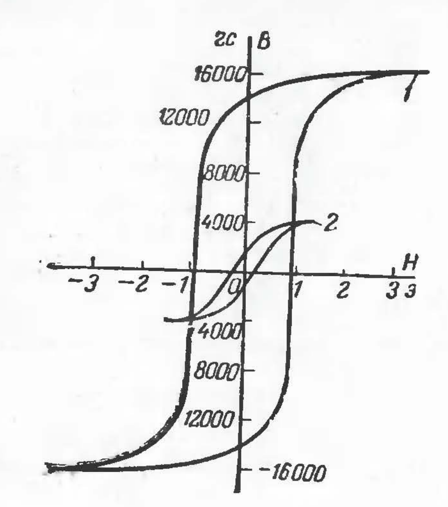



Рис. 1. Кривые гистерезиса стали и феррита.

*1* — трансформаторная сталь;
*2* — феррит.

нетиков является высокая магнитная проницаемость (до 25 000) на низких частотах.

Магнитодиэлектрики (альсифер, карбонильное железо и др.) представляют собой искусственно приготовленные неоднородные ферромагнетики, изготовленные путем смешения ферромагнитных порошков с диэлектриками. Вследствие особой технологии каждая ферромагнитная частичка оказывается окруженной слоем диэлектрика, отделяющим ее от соседних частиц. Благодаря такому строению магнитодиэлектрики имеют большое электрическое сопротивление и, следовательно, малые потери и применяются в диапазоне радиочастот. Магнитная проницаемость их невелика (не выше 80).

Применяемые в технике ферриты — это твердые растворы двух или нескольких простых ферритов, представляющих собой химические соединения двухвалентных марганца, никеля, цинка, лития с окислами железа. Свойства ферритов зависят от их состава и поэтому в названии феррита часто отражается его структура — «никель-цинковые», «марганцевые», «литиевые» и т. п.

2 Заказ 892

Основными характеристиками магнитного материала, в том числе и феррита, в пределах рассматриваемой области применения являются начальная магнитная проницаемость $\mu_0$ — проницаемость при малых (менее 1 *э*) напряженностях полей, тангенс угла потерь в диапазоне рабочих частот, а также температурный коэффициент проницаемости $TK\mu$, показывающий относительное изменение магнитной проницаемости при изменении температуры на 1° С.

Начальная магнитная проницаемость ферритов в зависимости от их химического состава и технологии изготовления изменяется от 10 до 7 000. Основным достоинством ферритов по сравнению с металлическими магнитными материалами является малая величина потерь на высоких частотах. Однако с ростом частоты потери увеличиваются, а магнитная проницаемость ферритов уменьшается.

Часто в справочниках приводятся цифры, характеризующие граничную частоту применения феррита. Под этим термином понимают частоту, при которой тангенс угла магнитных потерь составляет одну десятую (тангенс угла потерь определяется как частное от деления активного сопротивления потерь на величину реактивного сопротивления катушки индуктивности на данной частоте). Но так как сопротивление магнитных потерь зависит от частоты и индукции, а также от физических свойств магнитного материала, то понятие о граничной частоте весьма условно. Поэтому для тороидальных сердечников со сплошной намоткой граничная частота определяется экспериментально. Для сердечников других форм, в частности цилиндрических, значения граничной частоты повышаются. Так, если граничная частота феррита марки Ф-20 для тороидальных сердечников равна 15—20 *Мгц*, то для цилиндрических она составляет 40—45 *Мгц*. Аналогичные конструкции для феррита марки Ф-600 дают соответственно следующие цифры: для тороидальных сердечников 1,5 *Мгц*, а для цилиндрических — 2,8—3 *Мгц*.

Особенностью ферритов является уменьшение значений граничной частоты по мере увеличения начальной магнитной проницаемости.

В табл. 1 приведены электромагнитные свойства ферритовых тороидальных сердечников с равномерной однорядной обмоткой. Как видно из этой таблицы, магнитная проницаемость ферритов может изменяться в зависимости от характера намагничивающего поля.

Максимальная рабочая температура для никель-цинковых ферритов около 100° С (120° С для Ф-600, Ф-100 и 80° С для Ф-1000) у марганцево-цинковых ферритов она несколько выше (180° С для ФМ-1000 и ФМ-2000). Характерной особенностью ферритов является различие температурных коэффициентов проницаемости в области положительных и отрицательных температур (при отрицательных температурах температурный коэффициент больше).

Средний удельный вес ферритов 4,8 *г/см*³. Они тверды, хрупки и напоминают керамику. Поэтому обрабатывать ферриты можно лишь с помощью абразивов (корунда, алмазной пилы). Вообще механическая обработка ферритовых сердечников должна производиться лишь в случае крайней необходимости. Обработка ферритов на шлифовальных станках с жестким закреплением сердечников недопустима, так как вследствие резких вибраций может привести к потере ими магнитных свойств. Ферриты следует оберегать от резких ударов. Наиболее пригодны для обработки ферритов методы, приме-



Таблица 1

| Марка материала сердечника | Начальная проницаемость | Максимальная проницаемость | Тангенс угла потерь при частоте 100 *кгц* | Изменение проницаемости в течение года, % | Температурный коэффициент, x10⁻⁶ | Граничная частота, *кгц* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ФМ-3000 | 3 000 | 6 000 | 0,05 | — | 3 500 | 200 |
| ФМ-2000 | 2 000 | 4 500 | 0,04 | 0,7 | 3 000 | 450 |
| ФМ-2000 | 2 000 | 4 000 | 0,025 | — | 3 500 | 450 |
| ФМ-1000 | 1 200—800 | 2 000 | 0,02 | 0,5 | — | 750 |
| Ф-600 | 660—540 | 1 400 | 0,017 | 0,5 | 6 000 | 1 200 |
| Ф-400 | 400 | 800 | 0,013 | 0,5 | 2 000 | 1 500 |
| Ф-100 | 100 | 500 | 0,008 | 0,75 | 4 000 | 4 000 |
| Ф-40 | 40 | 150 | 0,006[1] | 0,5 | — | — |
| Ф-20 | 16—24 | 100 | 0,005[2] | 0,5 | 1 000 | 15 000 |
| Ф-15 | 15—17 | 40 | 0,006[1] | 0,5 | — | — |
| РЧ-50 | 50 | 150 | 0,02[3] | — | — | — |
| РЧ-25 | 25 | 120 | 0,01[3] | — | — | — |
| РЧ-15 | 15 | 45 | 0,009[3] | — | — | — |
| РЧ-10 | 10 | 17 | 0,007[3] | — | — | — |

[1] При частоте 1 *Мгц*.
[2] При частоте 5 *Мгц*.
[3] При частоте 20 *Мгц*.

няемые при шлифовании стекла. После ударных сотрясений ферритов возможно лишь частичное восстановление их магнитных свойств путем продолжительного прогрева при температуре, близкой к максимально допустимой.

Относительная диэлектрическая проницаемость ферритов на низких частотах (до 10 *кгц*) достигает весьма высоких значений (сотни и тысячи). Однако уже при частотах порядка 50 *кгц* и выше значения диэлектрической проницаемости уменьшаются до 50—100 и, медленно снижаясь, доходят до 10—15. В диапазоне радиочастот диэлектрическая проницаемость ферритов еще достаточно велика (от 20 до 40), хотя и обнаруживает тенденцию к дальнейшему понижению. Это обстоятельство следует учитывать при расчете межвитковой емкости катушек индуктивности.

В заключение остановимся на изменении свойств ферритов за пределами граничных частот, так как эти вопросы имеют не только теоретический интерес. Используя изменения свойств ферритов за пределами граничных частот, можно получить принципиально новые свойства элементов с ферритовыми сердечниками. На рис. 2 приведены кривые, показывающие изменение магнитной проницаемости и магнитных потерь ферритов от частоты. Падение магнитной

проницаемости $\mu_0$ выше граничной частоты у ферритов различных марок начинается с различных частот. Появлению падающего участка $\mu_0$ предшествует резкое увеличение магнитных потерь $\operatorname{tg} \delta$.

Помимо ферритов, большое распространение получили магнитодиэлектрики. Уступая ферритам в ряде свойств, они превосходят их по стабильности. Магнитодиэлектрики изготовляются из порошко-

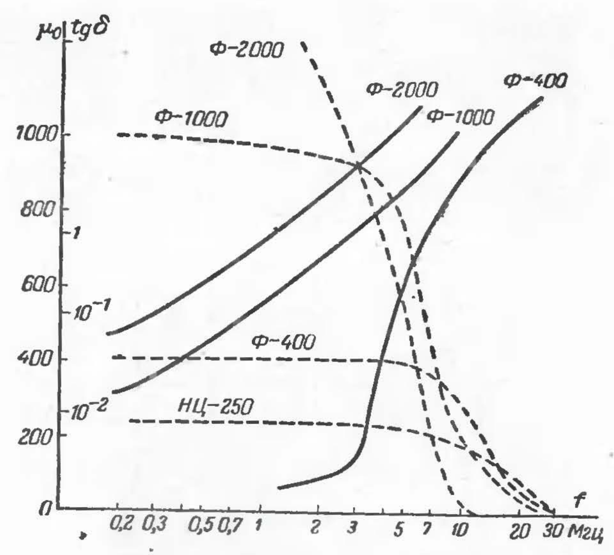



Рис. 2. Кривые изменения магнитной проницаемости и потерь у ферритов от частоты.

Пунктирные линии — $\mu_0$, сплошные линии — $\operatorname{tg} \delta$.

образных ферромагнитных материалов, частицы которых изолированы друг от друга диэлектрической связкой. В качестве магнитных материалов используют карбонильное железо, пермаллой (сплавы никеля с железом) и альсифер (железо-алюминий-кремниевые сплавы). В последнее время для этих целей используются и ферриты. В качестве связки применяют бакелитовую смолу, полистирол и стеклоэмали. Особенно широкое распространение получили сердечники из альсифера на стеклоэмалевой связке. Хотя они имеют несколько меньшую добротность по сравнению с карбонильными, зато обладают более высокой стабильностью во времени и при изменениях температуры. Характерно, что альсифер в отличие от других материалов имеет отрицательный температурный коэффициент проницаемости, что позволяет использовать его для компенсации изменения индуктивности от повышения температуры.

Параметры магнитодиэлектриков приведены в табл. 2. Основными преимуществами магнитодиэлектриков являются: малые



Таблица 2

| Марка материала | Класс материала | Начальная проницаемость, $\mu_0$ | Граничная частота, *Мгц* | $TK_{\mu_0} \cdot 10^{-6}$ | Коэффициенты потерь | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $\delta_h \cdot 10^{-3}$ | $\delta_f \cdot 10^{-9}$ | $\delta_n \cdot 10^{-3}$ |
| Р-4 | Карбонильное железо | 12 | 5 | 180 | 0,16 | 2 | 30 |
| П-4 | То же | 13 | 0,5 | 220 | 0,11 | 2,5 | 40 |
| ВЧ-32 | Альсифер | 30 | 0,5 | —250 | 2 | 85 | 1 |
| ВЧК-22 | То же | 22 | 1,5 | —50 | 1 | 12 | 1,2 |
| Прессперм | Пермаллой | 20 | 0,15 | — | 1 | 15 | 1 |

Примечание. $\delta_h$, $\delta_f$ и $\delta_n$ — максимальные коэффициенты потерь соответственно на гистерезис (при $H < 1$ э), на вихревые токи и на последействие.

потери на гистерезис и низкие значения ТКИ (температурного коэффициента индуктивности) по сравнению с ферритами. К этому следует добавить малую зависимость магнитной проницаемости от частоты.

## КОНСТРУКЦИЯ СЕРДЕЧНИКОВ И ПАРАМЕТРЫ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

Магнитные сердечники катушек индуктивности (рис. 3) конструктивно подразделяются на цилиндрические, пластинчатые и шпулевидные (с незамкнутым магнитным потоком), а также броне-

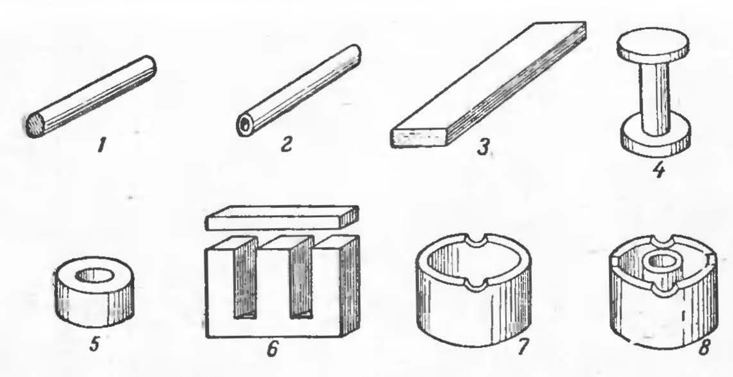



Рис. 3. Конструкция ферритовых сердечников.

1 — цилиндрический; 2 — трубчатый; 3 — пластинчатый; 4 — шпулевидный; 5 — тороидальный; 6 — Ш-образный; 7 — чашечный; 8 — броневой.

ные, тороидальные и Ш-образные (с замкнутым магнитным потоком). В свою очередь каждая из названных разновидностей сердечников имеет несколько типов, различающихся размерами или их соотношениями.

При конструировании катушек индуктивности радиочастотного диапазона характерно стремление к круглому сечению сердечников, обеспечивающему наибольшую добротность. Прямоугольные сечения сердечников применяются значительно реже, обычно в тех случаях, когда добротность катушки не является решающим фактором, или же по технологическим соображениям изготовления сердечников.

Технология изготовления ферритовых сердечников весьма сложна и практически исключает изготовление их радиолюбителями. Исходная смесь — шихта представляет собой тщательно перемешанный порошок мельчайшего помола, в который для облегчения прессования и связки частиц вводятся парафин, камфара или вода. Форма сердечнику придается в специальных пресс-формах при давлениях до 6 $т/см^2$. После придания сердечникам формы их спекают при высоких температурах (800—1 400° С), вследствие чего происходит формирование окончательного химического состава и структуры ферритов.

Ферритовые сердечники хорошо склеиваются. Для соединения отдельных частей сложного сердечника, например броневых сердечников или чашек, а также для крепления сердечников на шасси можно применять клеи БФ-2 и БФ-4. Наиболее прочное склеивание достигается эпоксидной смолой. При склеивании разбитых сердечников магнитные свойства их изменяются незначительно (при условии малости магнитного зазора).

Катушки индуктивности с магнитными сердечниками могут быть как с постоянной, так и с регулируемой величиной индуктивности. Первые обычно применяются в качестве дросселей, а вторые в одиночных контурах и фильтрах. В последнем случае конструкция сердечника позволяет регулировать величину немагнитного зазора, изменять положение сердечника относительно каркаса катушки и вводить дополнительный магнитный сердечник (подстроечник) в полую часть основного сердечника.

Для сердечников различных трансформаторов и вариометров, перестройка частоты которых осуществляется с помощью дополнительных обмоток, в большинстве случаев используются те же материалы, что и для сердечников одиночных катушек индуктивности.

Значительный интерес представляет использование сердечников в элементах цепей, в которых отсутствует (в явном виде) обмотка катушки индуктивности. В этих элементах ферриты играют роль среды, окружающей токоноситель и изменяющей его свойства. Эта область применения ферритов сравнительно мало изучена, однако, несомненно, имеет большое будущее. Некоторые из подобных применений ферритов будут описаны ниже.

Основными параметрами катушек являются индуктивность и величина потерь, а также изменение их при воздействии окружающей среды (температуры, влажности, внешних магнитных полей и др.). В ряде применений катушек с магнитными сердечниками одним из важнейших параметров их является стабильность (постоянство индуктивности во времени при температурных изменениях и воздействиях других внешних факторов),



Индуктивность катушки с магнитным сердечником зависит (помимо числа витков) от формы и материала сердечника. Наиболее просто эта зависимость выражается для тороидальных сердечников, где эффективная магнитная проницаемость сердечника $\mu_e$ соответствует начальной магнитной проницаемости материала $\mu_0$. Для броневых же сердечников и сердечников высокочастотных дросселей расчет индуктивности катушки возможен лишь после определения величины эффективной магнитной проницаемости, которая обычно определяется путем измерений индуктивности катушки с сердечником ($L_c$) и без него ($L_0$) и последующего вычисления по формуле

$$\mu_e = \frac{L_c}{L_0}.$$

Для наиболее простых конфигураций сердечников, например цилиндрических, величина $\mu_e$ рассчитывается, а для других конфигураций определяется опытным путем.

Величину потерь в катушках индуктивности без сердечника определяет значение добротности $Q$ (отношение реактивного сопротивления на данной частоте к активному сопротивлению потерь). Общие потери в катушке индуктивности с сердечником определяются как магнитными потерями катушки, так и активным сопротивлением обмотки. В большинстве случаев определяющим является сопротивление магнитных потерь $r_м$, поэтому при расчетах сопротивление обмотки обычно не учитывается. Следует иметь в виду, что сопротивление $r_м$ не является постоянным, так как, помимо зависимости от частоты, оно является функцией амплитуды намагничивающей силы $H$, индуктивности $L$ и определяется по формуле

$$r_м = hLHf + wLf^2 + nLf,$$

где $h$, $w$, и $n$ — постоянные, зависящие от исходного магнитного материала и пропорциональные коэффициентам потерь соответственно на гистерезис, вихревые токи и последействие.

## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ДРОССЕЛИ

В радиоаппаратуре дроссели используются в качестве элементов разветвляющих цепей. Основное назначение дросселей — служить большим сопротивлением для переменного тока и в то же время обладать малым сопротивлением постоянному току. Исходя из этого, основными характеристиками дросселя, которые необходимо знать при его конструировании и использовании, являются полное сопротивление и сопротивление постоянному току. Число витков дросселя определяется необходимой индуктивностью, обеспечивающей заданное полное сопротивление. Однако наличие собственной емкости (межвитковой, межслоевой) может привести к вредным явлениям резонанса, которые особенно нежелательны при использовании дросселей в широком диапазоне частот. Применение ферритовых сердечников расширяет рабочий диапазон частот дросселей, исключая в большинстве случаев явления резонанса.

На рис. 4 показан внешний вид дросселей с ферритовыми сердечниками и для сравнения дроссель той же индуктивности без сердечника.

Частота резонанса дросселя определяется величиной его собственной емкости, чем меньше эта емкость, тем при наибольшей частоте проявляются резонансные явления. Уменьшить собственную емкость дросселя можно, применяя однослойную обмотку. Выводы обмотки дросселя можно крепить на сердечнике. Для этого его концы серебрят, залуживают и подпаивают к ним выводы обмотки и жесткие проводники для крепления в монтаже.

Для увеличеиия полосы пропускания дросселей наиболее целесообразно применять в качестве сердечников феррит марки Ф-600,

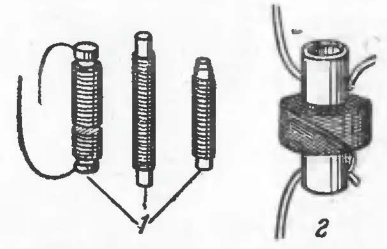



Рис. 4. Внешний вид высокочастотных дросселей.

*1* — с сердечником; *2* — без сердечника.

у которого с увеличением частоты уменьшается диэлектрическая проницаемость, а после граничной частоты — и магнитная проницаемость. Эти свойства магнитных материалов позволяют изготовлять дроссели как бы с переменными индуктивностью и собственной емкостью при изменении частоты и тем самым исключить резонансные явления в широком диапазоне частот. Наличие потерь у ферритов за пределами граничной частоты также играет положительную роль, сглаживая резонансные явления.

Конструкция дросселя с ферритовым сердечником достаточно проста: на стержень накладывают слой конденсаторной бумаги или диэлектрической пленки, на который наматывают однослойную обмотку.

Кроме цилиндрических сердечнпков для дросселей возможно применение и тороидальных сердечников. В этом случае необходимо помнить о зависимости проницаемости сердечника от подмагничивающего поля. Для более высоких частот и в случае значительных токов подмагничивания, протекающих через дроссель, необходимо применять ферриты с малыми потерями и меньшей проницаемостью (Ф-100, РЧ-50, РЧ-20). В табл. 3 и 4 приведены соответственно размеры цилиндрических и трубчатых стержней из никель-цинковых ферритов с различной величиной проницаемости.

Для расчета дросселей с цилиндрическими сердечниками необходимо знать значение эффективной магнитной проницаемости $\mu_e$.



Таблица 3

| Марка феррита | Размеры, *мм* | | Вес, *г* | Марка феррита | Размеры, *мм* | | Вес, *г* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Диаметр | Длина | | | Диаметр | Длина | |
| Ф-600 | 1,8 | 12 | 0,14 | Ф-600 | 3,5 | 20 | 1,2 |
| Ф-100 | 2,74 | 12 | 0,34 | Ф-600 | 3,5 | 30 | 1,6 |
| Ф-600 | 2,74 | 12 | 0,34 | Ф-600 | 7,0 | | 32,4 |
| Ф-100 | 2,74 | 14 | 0,4 | Ф-600 | 8,0 | 140 | 32,4 |
| Ф-600 | 2,74 | 14 | 0,4 | Ф-600 | 8,4 | | 32,4 |
| Ф-100 | 2,86 | 12 | 0,34 | Ф-600 | 7,6 | | 36,7 |
| Ф-600 | 2,86 | 12 | 0,34 | Ф-600 | 8,0 | 160 | 36,7 |
| Ф-100 | 2,86 | 14 | 0,4 | Ф-600 | 3,4 | | 36,7 |
| Ф-600 | 2,86 | 14 | 0,4 | Ф-600 | 8,4 | 80 | 16,2 |
| Ф-20 | 2,86 | 8 | 0,12 | Ф-400 | 9,8 | 40,5 | 14 |
| Ф-600 | 2,86 | 18 | 0,2 | Ф-600 | 17 | 14,5 | 13 |
| Ф-600 | 3,5 | 13 | 0,7 | | | | |

Таблица 4

| Марка ферритов | Размеры, *мм* | | |
|---|---|---|---|
| | Наружный диаметр | Внутренний диаметр | Длина |
| Ф-600 | 2,75 | 0,75 | 12 |
| Ф-600 | 35 | 0,9 | 13 |
| Ф-1000 | 6 | 2 | 32 |
| Ф-1000 | 16 | 8 | 57 |

На рис. 5 приведены кривые зависимости $\mu_e$ от отношения длины сердечника к его диаметру $l/d$. Зная величину $l/d$ и полагая, что однослойная обмотка полностью покрывает сердечник, нетрудно определить число витков обмотки:

$$w = \sqrt{\frac{L_0}{L' d_к \mu_e}},$$

где $d_к$ — диаметр обмотки катушки, *см*,

$L_0$ — индуктивность катушки без сердечника.

В этой формуле значения $L'$, зависящие от отношения $l_к/d_к$, определяются по графику на рис. 6, где $l_к$ и $d_к$ — длина и диаметр обмотки. Необходимая величина индуктивности дросселя $L_{др}$ (в микрогенри) определяется на нижней частоте диапазона из условия $Z_{др} > 5Z_н$,

где $Z_н$ — полное сопротивление нагрузки, *ом*.

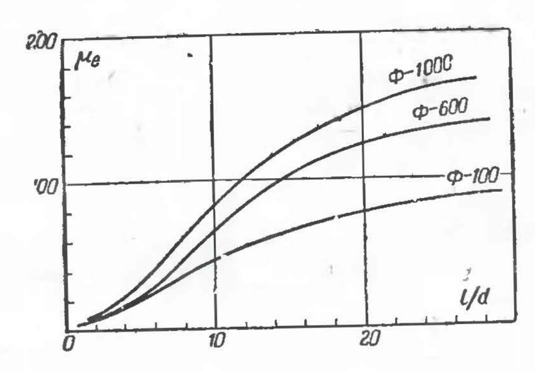



Рис. 5. Зависимость $\mu_e$ от соотношения $l/d$ для ферритов различных проницаемостей.

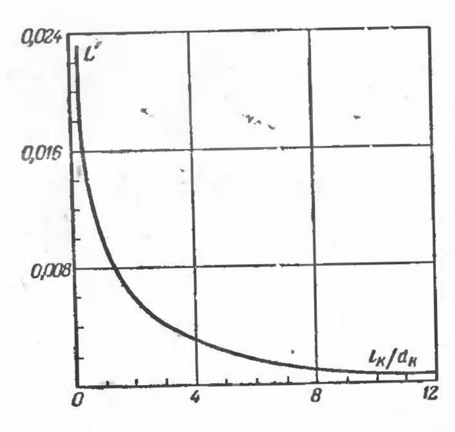



Рис. 6. Зависимость коэффициента $L'$ от отношения $l_к/d_к$.

## КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ С ТОРОИДАЛЬНЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

Катушки индуктивности и трансформаторы с тороидальными сердечниками применяются в тех случаях, когда требуется при минимальных габаритах получить наибольшую величину индуктивности. Преимуществом их является малое рассеяние магнитного потока, а

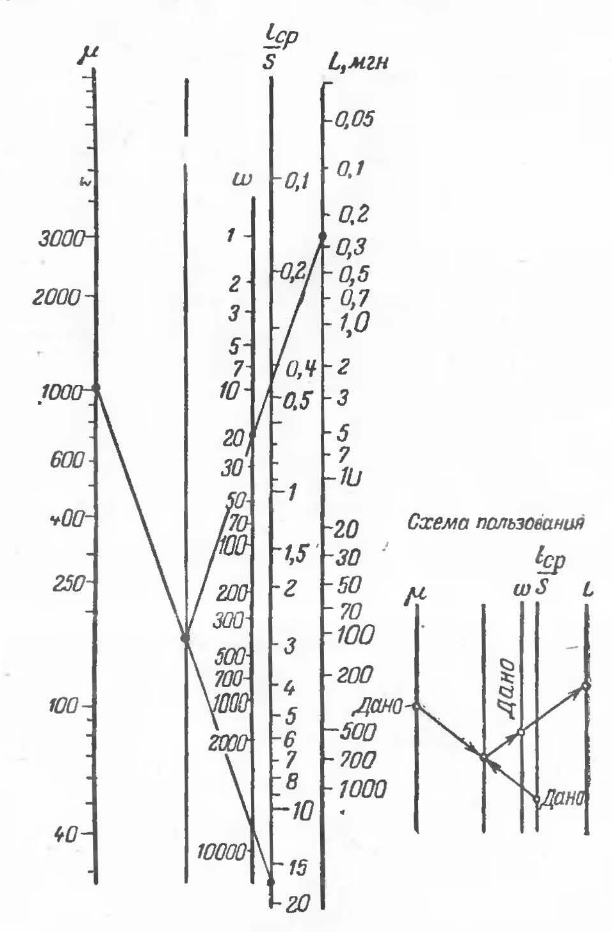



Рис. 7. Номограмма для определения индуктивности тороидальных катушек с ферритовыми сердечниками.

**Пример.** **Дано:** сечение тора $S = 0.25$ *см²*; $l_{cp} = 4.5$ *см*; $w = 20$; $\mu = 1\,000$. **Ответ:** $L = 0.27$ *мгн*.

недостатком — относительная сложность их намотки и отсутствие возможности плавной регулировки индуктивности.

Индуктивность (в генри) тороидальной катушки с прямоугольным сечением сердечника определяется по формуле

$$L=2\mu_д w^2 h \ln\frac{r_н}{r_в}10^{-9},$$

где $w$ — число витков однослойной сплошной намотки;
$h$ — высота тора, *см;*
$r_н$ и $r_в$ — наружный и внутренний радиусы тора, *см;*
$\mu_д$ — динамическая магнитная проницаемость сердечника.

Индуктивность тороидальной катушки с сердечником любого сечения можно рассчитать по следующей формуле:

$$L=0,4\ \pi\ w^2\ \mu_д\frac{S}{l_{ср}}10^{-8},$$

где $S$ — площадь сечения сердечника, *см;*
$l_{ср}$ — средняя длина силовой линии, *см.*

Для быстрых расчетов удобно пользоваться номограммой, приведенной на рис. 7.

Несколько слов о параметре $\mu_д$. Одним из недостатков ферритов является изменение магнитной проницаемости сердечника при изменении величины магнитного потока. Иначе говоря, изменение амплитуды тока в обмотке вызывает изменение индуктивности катушки, которое и учитывается с помощью динамической проницаемости. При малых потоках вместо $\mu_д$ подставляются значения начальной магнитной проницаемости $\mu_0$. В условиях наличия постоянного тока, протекающего через обмотку, в формулу для определения индуктивности подставляется величина обратимой проницаемости $\mu_r$, которая особенно резко изменяется от величины подмагничивающего поля у ферритов с высокой начальной магнитной проницаемостью.

Зависимость магнитной проницаемости от подмагничивающего поля позволяет управлять параметрами цепей, содержащих магнитные элементы, путем изменения тока подмагничивания. Достоинством такого метода, называемого иногда «магнитной настройкой», являются его безынерционность и простота. Магнитную настройку целесообразно использовать в системах автоподстройки, в генераторах качающейся частоты и т. п. Пределы магнитной перестройки могут быть весьма значительны при условии, что используются ферриты с высокой магнитной проницаемостью. На рис. 8 приведены экспериментальные кривые изменения величины $\mu_r$ для ферритов различных марок в зависимости от величины постоянного намагничивающего поля. На графике по оси абсцисс отложена напряженность намагничивающего поля в эрстедах, которая связана с намагничивающим током следующей зависимостью:

$$H=\frac{1,25\ Iw}{l_{ср}}$$

где $I$ — величина постоянного тока подмагничивания, *а.*



Наша промышленность выпускает обширный ассортимент тороидальных сердечников, различающихся как по материалам, так и по размерам. Данные таких сердечников из никель-цинковых ферритов приведены в табл. 5.

Выбор провода (его диаметра и марки) для тороидальных катушек определяется числом витков, размерами сердечника и назна-

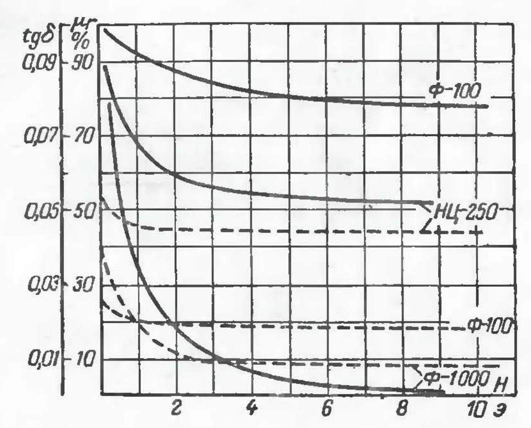



Рис. 8. Изменение tg δ (штриховые линии) и $\mu_r$ (сплошные линии) при изменении напряженности намагничивающего поля.

Таблица 5

| Размеры, *мм* | | | Размеры, *мм* | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Наружный диаметр | Внутренний диаметр | Высота | Наружный диаметр | Внутренний диаметр | Высота |
| 7 | 4 | 2 | 31 | 18 | 7 |
| 8,7 | 3,41 | 2,3 | 32 | 20 | 6,5 |
| 8,7 | 3,52 | 2,3 | 32 | 22 | 6,5 |
| 3 | 5 | 2,5 | 35 | 27,5 | 19 |
| 10 | 5 | 5 | 38 | 24 | 7 |
| 12 | 5 | 5 | 41 | 25 | 7 |
| 13 | 5,5 | 5 | 46 | 36 | 16 |
| 17,5 | 8 | 5 | 55,5 | 34 | 12 |
| 20,5 | 11 | 5 | 62 | 50 | 6 |
| 22 | 10 | 6 | 65,5 | 41 | 14 |
| 25 | 12,5 | 7 | 70 | 50 | 10 |
| 28 | 14 | 7 | 100 | 60 | 15 |
| | | | 120 | 80 | 10 |

ГТ

чением катушки. В тех случаях, когда магнитные потери малы по сравнению с потерями в активном сопротивлении провода (на низких частотах), расчет диаметра провода и сопротивления обмотки

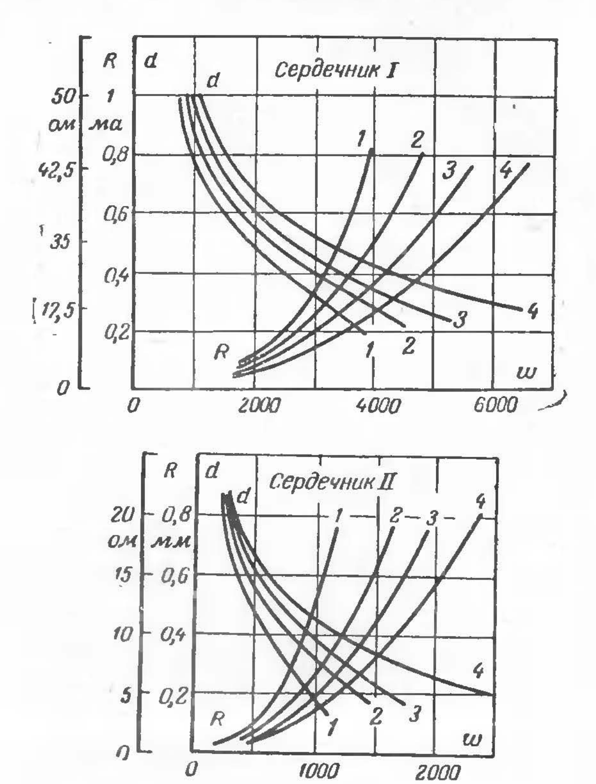



Рис. 9. Кривые для выбора оптимального числа витков и диаметра провода.

1 — ПЭЛ и ПЭБД; 2 — ПЭШО и ПШО; 3 — ПШО; 4 — ПЭ.

катушек индуктивности для сердечников с размерами, указанными в табл. 6, производится по графикам, приведенным на рис. 9.

Для катушек индуктивности, работающих на звуковых частотах, считается, что оптимальный сердечник (обеспечивающий минимальный объем катушки требующейся добротности) должен иметь отношение внутреннего радиуса к наружному 0,5—0,6 и высоту, примерно равную наружному радиусу.



Таблица 6

| Размеры, мм | Сердечник I | Сердечник II |
|---|---|---|
| Наружный диаметр | 70 | 38 |
| Внутренний диаметр | 50 | 24 |
| Высота | 10 | 7 |

## КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ С БРОНЕВЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

Броневые сердечники нашли широкое применение в контурах фильтров радиоэлектронной аппаратуры. Основные требования,

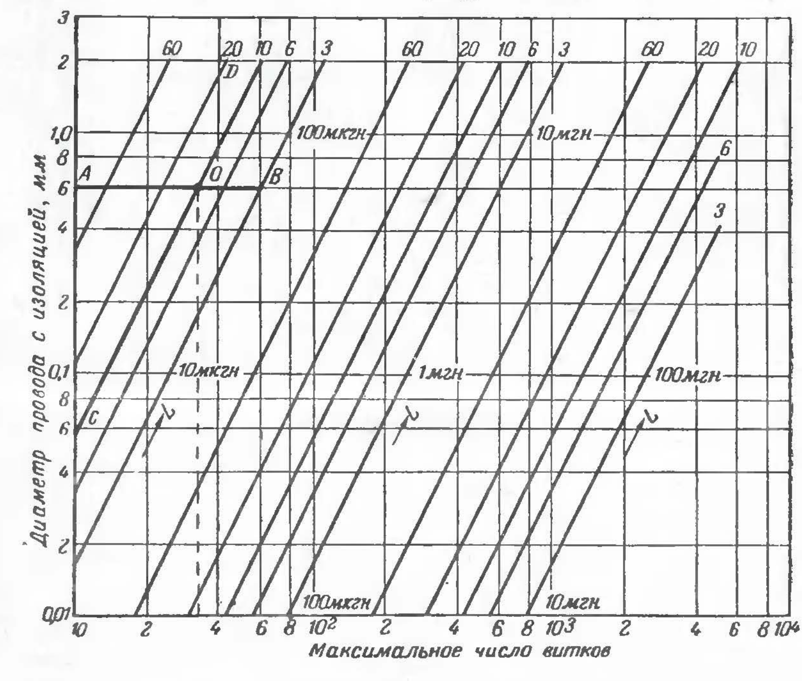



Рис. 10. Номограмма для расчета катушек на броневых сердечниках диаметром 12 *мм*.

предъявляемые к таким контурам, следующие: малые габариты, высокая добротность и сравнительно большая стабильность параметров при изменениях окружающей температуры и напряжений.

Стабильность параметров контура в основном определяется стабильностью параметров катушки индуктивности, так как конденсаторы обычно вполне удовлетворяют требованиям, предъявляемым к контурам. Температурный коэффициент индуктивности (ТКИ) катушек с броневыми сердечниками из карбонильного железа — от 60 до $90 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$. У катушек с сердечниками из альсифера ТКИ

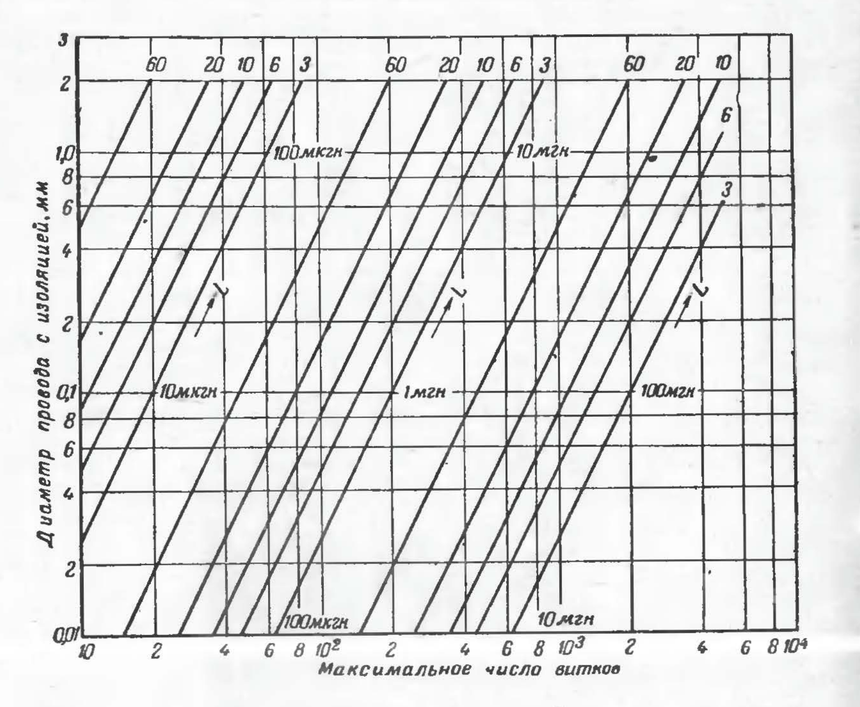



Рис. 11. Номограмма для расчета катушек на броневых сердечниках диаметром 18 *мм*.

может быть получено от 1 до $30 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$, у катушек с ферритовыми сердечниками ТКИ составляет $250 \div 300 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$.

Следует отметить, что температурный коэффициент ферритовых броневых сердечников в несколько раз больше аналогичного коэффициента сердечников из альсифера и других магнитодиэлектриков. Некоторое исключение составляют сердечники, изготовленные из высокочастотных ферритов марки РЧ-20, стабильность которых приближается к стабильности сердечников из магнитодиэлектриков.

Благодаря более высокой эффективной проницаемости и меньшим потерям в магнитном материале, применение ферритов для сердечников катушек индуктивности позволяет повысить их добротность или (при сохранении добротности) уменьшить габариты. Добротности катушек с сердечниками из ферритов значительно превосходят (1,5—2 раза) добротности катушек с сердечниками из карбонильного железа.

Отличительным свойством катушек индуктивности с броневыми сердечниками является высокая степень их экранирования. Замкнутый магнитопровод сердечника образует магнитный экран, препятствующий рассеянию магнитного поля катушки, а следовательно, об-

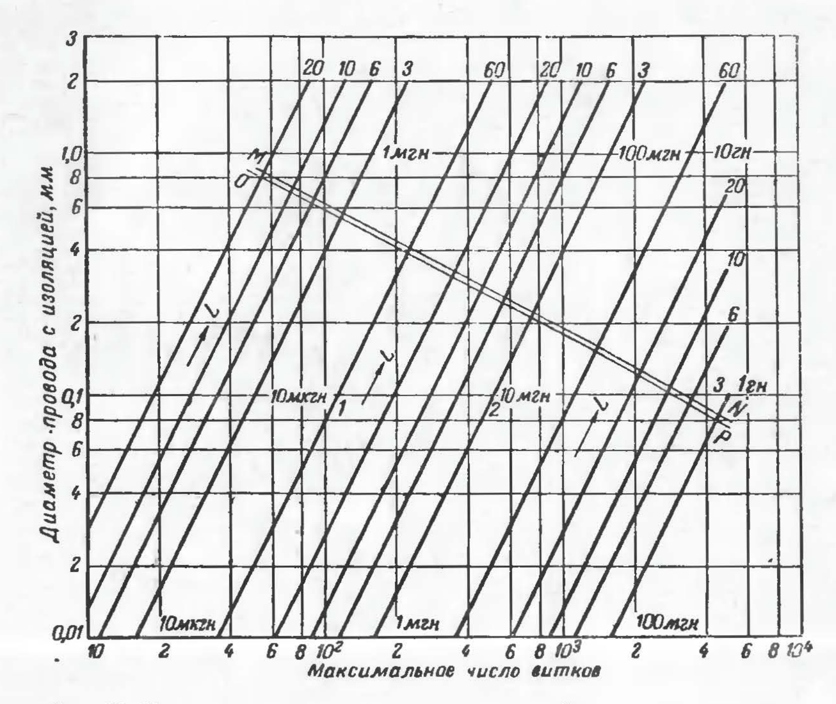



Рис. 12. Номограмма для расчета катушек на броневых сердечниках диаметром 23 *мм*.

разованию паразитных связей. Поэтому броневые сердечники целесообразно применять в многокаскадных усилителях. Наличие магнитного экрана в сердечнике не исключает необходимости в установке электростатического экрана, что обеспечивает максимальную экранировку катушки.

Поскольку расчетных формул для катушек с броневыми сердечниками не опубликовано, на рис. 10—14 приводятся номограммы для расчета катушек на различных сердечниках.

Отличительной особенностью этих номограмм является использование осей координат в качестве осей расположения искомых величин: на горизонтальной оси отыскивается число витков, а на вертикальной — максимальный диаметр провода с изоляцией. На каждой номограмме располагается несколько групп наклонных линий.

Выбор группы линий определяется величиной требующейся индуктивности (числа с правой стороны линии), а самой линии — величиной магнитной проницаемости броневого сердечника, указанной над линией.

Значения индуктивности на номограмме даются в логарифмическом маштабе горизонтальными линиями. При этом на каждой горизонтальной линии откладывается несколько отрезков (обычно 2—3), каждый из которых соответствует определенной индуктивно-

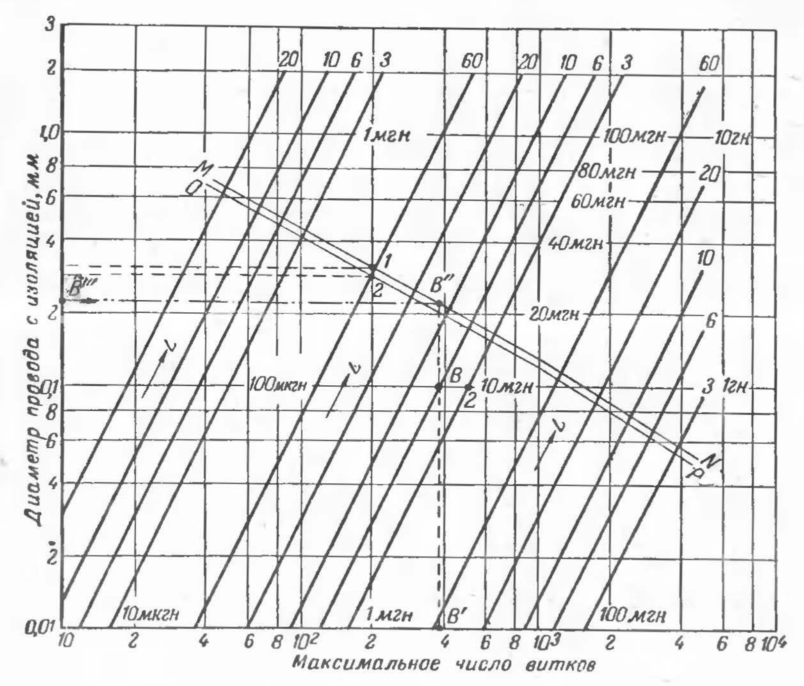



Рис. 13. Номограмма для расчета катушек на броневых сердечниках диаметром 28 *мм*.

сти. Величина отрезков ограничивается справа наклонной линией, соответствующей магнитной проницаемости 3, а слева — 60. Выбор горизонтальной линии производится, исходя из первых значащих цифр требуюшейся индуктивности, отложенных по вертикали справа от групп наклонных линий, с учетом масштаба, указанного цифрами на номограмме.

Линии числа витков на номограммах пересекаются двумя (или одной) линиями максимального диаметра провода, идущими из левого верхнего в правый нижний угол номограммы.

Таким образом, каждая номограмма для данного размера сердечника позволяет определить необходимое число витков для по-



лучения заданной индуктивности и максимальный диаметр провода при данном числе витков, выбрать необходимые размеры и эффективную магнитную проницаемость сердечника, определить индуктивность при известном числе витков катушки, найти марку провода для катушки, учесть влияние каркаса и т. п.

В качестве примера определим число витков катушки индуктивности фильтра промежуточной частоты на ферритовом сердечнике диаметром 12 *мм* (рис. 10). Обычно эффективная магнитная

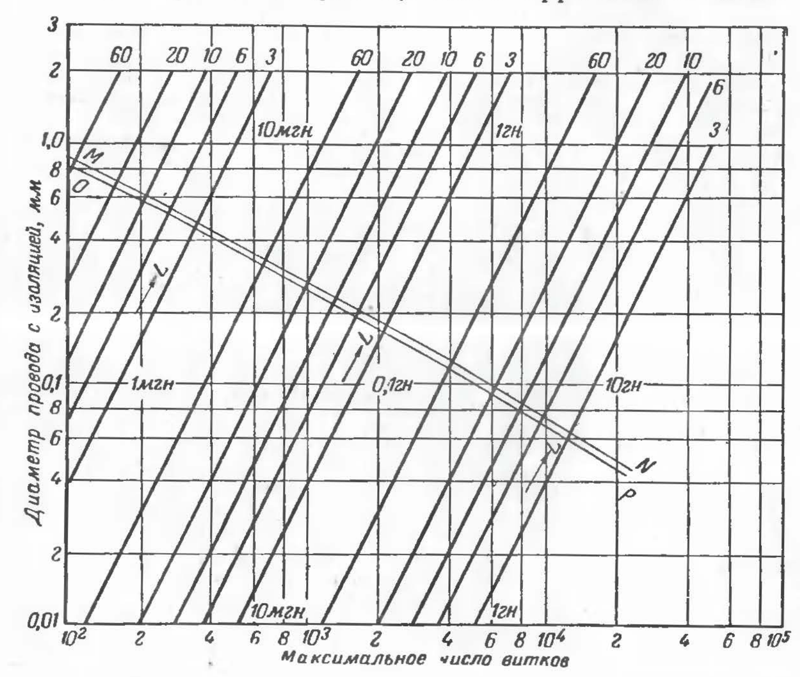



Рис. 14. Номограмма для расчета катушек на броневых сердечниках диаметром 34 *мм*.

проницаемость подобных броневых сердечников без зазора составляет 10—12 *гс/э*. Пусть в рассматриваемом случае требующаяся индуктивность $L_0$=60 *мкгн*. Найдем соответствующий отрезок горизонтальной линии, ограниченный точками *AB* (рис. 10), который соответствует требуемой индуктивности. Этот отрезок лежит в первой группе линий проницаемости, так как именно этой группе соответствует интервал значений индуктивности от 10 до 100 *мкгн* (см. числа, лежащие справа от линий).

Найдя в этой группе линию, соответствующую данной эффективной проницаемости (линия *CD*), определяем точку пересечения (*O*), и опустив перпендикуляр на горизонтальную линию, получим требующееся число витков (32 витка).

Иногда нужно определить диаметр провода (в изоляции), которым может быть намотана катушка с определенным числом витков и данном сердечнике. Для этого следует отыскать на горизонтальной оси (рис. 12) необходимое число витков (200) и провести перпендикуляр до пересечения с линиями *MN* и *OP*. Получившиеся точки пересечения *1* и *2* дают диаметр провода: 0,3 *мм* при бескаркасной намотке (точка *1*) и 0,27 *мм* при намотке катушки на каркасе (точка *2*).

В заключение рассмотрим полный расчет катушки индуктивности с броневым сердечником (рис. 12). Карбонильный броневой сердечник диаметром 23 *мм* имеет эффективную проницаемость $\mu_e = 6$. Требующаяся индуктивность катушки составляет 10 *мгн*. Тогда точка *B* на номограмме соответствует на горизонтальной оси точке *B'* (380 витков).

Для определения максимально допустимого диаметра провода при полном заполнении каркаса катушки находим точку пересечения *B″* линии числа витков и линий максимального диаметра провода (*MN* и *OP*), вертикальная ось которой обозначает максимально допустимый наружный диаметр провода (точка *B‴*, соответствующая 0,22 *мм*).

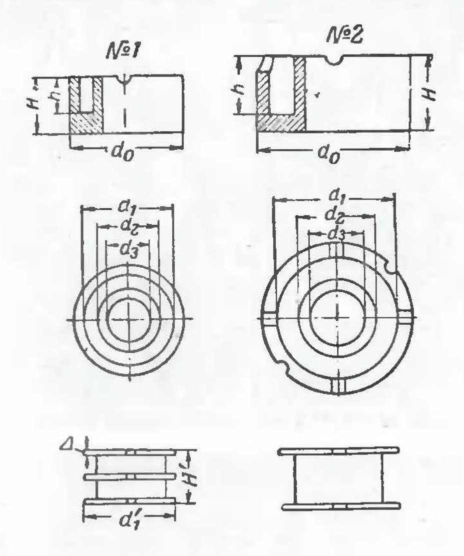



Рис. 15. Типовые размеры каркасов и броневых сердечников.

Верхняя линия (*MN*) предназначена для расчета при бессекционном, а нижняя (*OP*) при секционированном каркасе (2 или 3 секции).

Для пользования номограммой необходимо знать тип сердечника и его эффективную проницаемость. Конструкции типовых броневых сердечников, выпускаемых промышленностью, приведены на рис. 15. Размеры ферритовых сердечников совпадают с размерами аналогичных карбонильных сердечников, поэтому номограммы действительны как для одних, так и для других. Размеры каркасов и сердечников приводятся в табл. 7.



Таблица 7

| Номер на рис. 15 | Размеры сердечника, *мм* | | | | | | Размеры каркаса, *мм* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $d_0$ | $d_1$ | $d_2$ | $d_3$ | $h$ | $H$ | $d_1'$ | $H'$ | Δ |
| *1* | 12 | 10 | 6 | 4,4 | 4,1 | 5,5 | 9,9 | 8,1 | 0,3 |
| *2* | 18 | 14 | 7,4 | 4,4 | 5 | 7 | 13,9 | 9,9 | 0,4 |
| *2* | 23 | 18 | 10,8 | 7,4 | 6 | 8,5 | 17,9 | 11,9 | 0,5 |
| *2* | 28 | 22 | 12,8 | 8,4 | 8,5 | 11,5 | 21,9 | 16,9 | 0,6 |
| *2* | 34 | 27 | 13,3 | 8,4 | 10,2 | 14 | 26,9 | 20,3 | 0,7 |

## РАСЧЕТ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ С МАГНИТНЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

Результатом расчета электрических параметров катушек индуктивности является выбор типа, материала и размеров сердечника, а также вида намотки, числа витков и марки провода.

Тип сердечника обычно выбирается в зависимости от назначения катушки. При выборе материала основными являются соображения по обеспечению требуемой добротности и устойчивости параметров катушки при изменении частоты, температуры и тока.

Добротность катушки на высоких частотах определяется в основном потерями в сердечнике. Поэтому при необходимости получения максимальной добротности следует выбирать материал с наибольшим значением произведения $\mu_0 Q$ в рабочем диапазоне частот. На рис. 16 приведен график, позволяющий определить значения $\mu_0 Q$ для тороидальных сердечников из ферритов различных марок.

В случае, если форма сердечника отличается от тороидальной, $\mu_0 Q$ должно рассматриваться как произведение относительных значений $\mu_e$ и $Q_e$, соответствующих данной форме сердечника.

Добротность катушки индуктивности с магнитным сердечником определяется по формуле

$$Q_к = \frac{Q_{об}\, Q_м}{Q_{об} + Q_м},$$

где $Q_{об}$ — добротность обмотки при условии, что ее индуктивность равна индуктивности катушки с сердечником;

$Q_м$ — добротность сердечника.

В зависимости от соотношения $Q_{об}$ и $Q_м$ решается вопрос о целесообразности зазора в сердечнике: если добротность обмотки выше добротности материала сердечника, то, вводя зазор, увеличи-

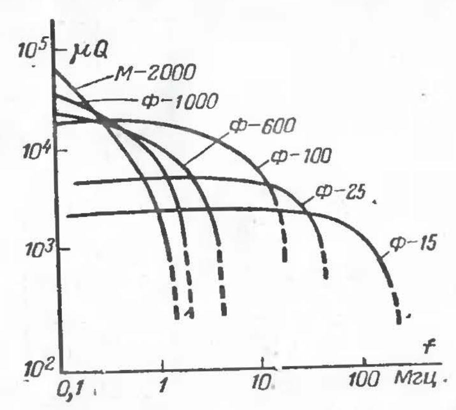



Рис. 16. Значения произведения $\mu Q$ для тороидальных сердечников из различных ферритов.

вают добротность сердечника, а следовательно, и общую добротность катушки.

Путем выбора оптимальной величины зазора в сердечнике можно получить максимальную добротность катушки. Величина оптимального зазора определяется по формуле

$$l_з = \frac{l_{ср}}{\mu_0}\left(\sqrt{\frac{Q_{об}}{Q_м}} - 1\right),$$

где $\mu_0$ и $l_{ср}$ — соответственно магнитная проницаемость и средняя длина силовой линии сердечника без учета зазора.

Если величина $l_з$ получается отрицательная, то зазор не улучшает добротности.

Введение зазора улучшает также стабильность параметров катушки. Если ТКИ катушки с замкнутым сердечником целиком определяется величиной $TK\mu_0$, то при введении зазора (при условии, что $l_з/l_{ср} \leqslant 0{,}01$) температурный коэффициент индуктивности

$$ТКИ_з = \frac{ТК\,\mu_0}{1 + \frac{l_з}{l_{ср}}\mu_0}.$$



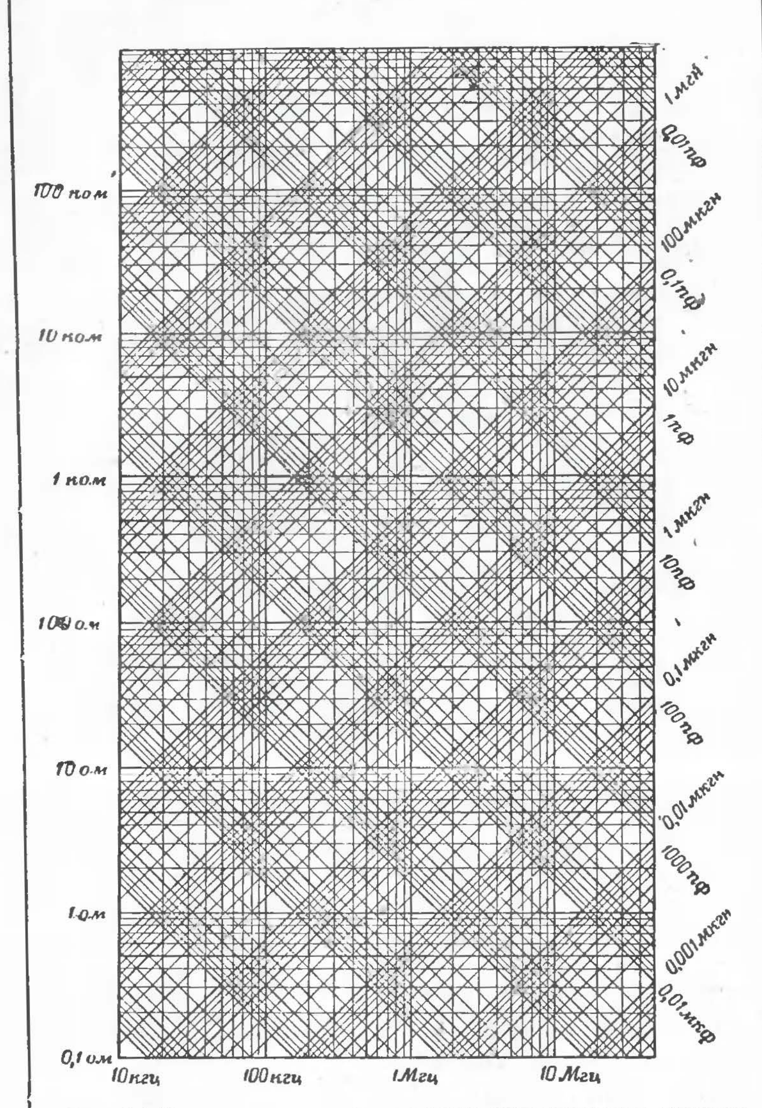



Рис. 17. Номограмма для определения индуктивности катушки или ее реактивного сопротивления.

Магнитная проницаемость сердечника с зазором

$$\mu_з = \frac{\mu_0}{1 + \mu_0 \frac{q}{b}}$$

где $q = \frac{l_з}{l_{ср}}$ и $b = \frac{S_з}{S_{ср}}$ — отношение сечений зазора и сердечника (чаще всего $b = 1$).

При расчетах катушек индуктивности часто бывает необходимо найти величину собственной емкости катушки, определяющую верхнюю границу ее частотного диапазона. Собственную емкость можно приближенно вычислить, измерив предварительно индуктивность катушки на низких частотах, когда влияние этой емкости практически неощутимо, и затем на более высокой частоте $f_1$. Если результат первого измерения обозначить через $L_0$, а второго — через $L_1$, то собственная емкость

$$C_{соб} \approx 25 \frac{L_1 - L_0}{f_1^2 L_1^2}$$

где $C_{соб}$ выражается в пикофарадах, $L_1$ и $L_0$ — в микрогенри, а $f_1$ — в мегагерцах.

При расчетах элементов контуров бывает необходимо по известной емкости определить на заданной частоте индуктивность катушки или величину ее реактивного сопротивления. В этих случаях целесообразно пользоваться номограммой, приведенной на рис. 17. Здесь на горизонтальной оси отложены значения частоты, а на вертикальной — реактивного сопротивления. Наклонные линии соответствуют значениям индуктивности и емкости. В качестве примера найдем индуктивность $L$ контура, настроенного на частоту 10 *Мгц* при условии, что его емкость равна 50 *пф* (точка $B$). Соответствующая индуктивность составит 5 *мкгн*, а реактивное сопротивление будет около 330 *ом*.

## СХЕМЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПЕЙ С МАГНИТНЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

**Стабильный генератор низкой частоты.** При использовании магнитных материалов для контурных катушек генераторов необходимо учитывать значительную нестабильность их магнитной проницаемости, а следовательно, и их индуктивности. Только при очень небольших намагничивающих полях ($H \leqslant 0{,}5$ *э*) и использовании сердечников с малой проницаемостью, например магнитодиэлектриков, относительное изменение частоты генератора, определяющееся нестабильностью катушки, может быть менее $50 \cdot 10^{-6}$.

Уменьшить влияние нестабильности сердечника на частоту генератора можно путем выбора оптимального режима схемы. В генераторе, собранном по схеме, приведенной на рис. 18 и предназначенном для работы на частоте 6 *кгц*, контурная катушка, добротностью 50, выполнена на альсиферовом сердечнике ВЧ-32. Генератор собран на лампе 6Ж1Б с индуктивной обратной связью и автоматическим смещением в цепи управляющей сетки. Максимальный уход частоты этого генератора при изменении питающих напряжений на ±10% от номинального составляет 0,15 *гц*.

**Преобразователь напряжения.** Если в схеме на рис. 18 основным являлось увеличение стабильности генератора, то в описываемой ниже схеме преобразователя напряжения на полупроводниках высокая стабильность контура на ферритах не играет значительной роли, так как здесь на первый план выступают малые габариты сердечника и простота конструкции. Принципиальная схема однотактного преобразователя напряжения приведена на рис. 19. Катушка индуктивности $L_2$, выполненная вместе с витками связи $L_1$ на тороидальном сердечнике (проницаемостью $\mu_0 = 2\,000$—$3\,000$), образует совместно с конденсатором $C_1$ и сопротивлением $R_1$ генератор релаксационных колебаний с частотой 10—15 *кгц*. Колебания задающего

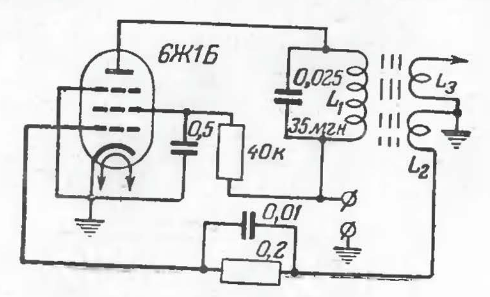



Рис. 18. Принципиальная схема стабильного низкочастотного генератора.

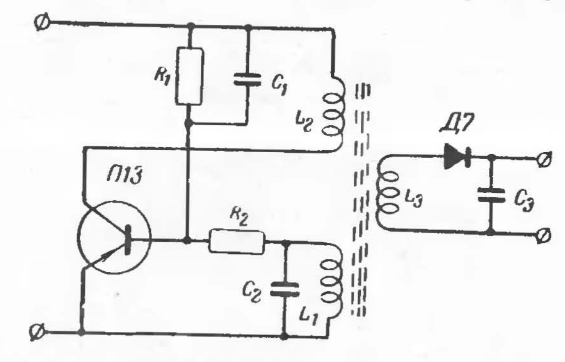



Рис. 19. Принципиальная схема однотактного преобразователя напряжения.

генератора трансформируются повышающей вторичной обмоткой $L_3$ и выпрямляются диодом типа Д7.

Подобные устройства способны преобразовывать постоянное напряжение 1—2 *в* до 100 *в* и более при к. п. д. порядка 40—50%. Номиналы отдельных деталей схемы, типы полупроводниковых приборов и размеры сердечника зависят от требующейся мощности, которая может быть получена в пределах от десятка милливатт до единиц и даже десятков ватт. Соответственно сердечники тороидов выбирают с внешним диаметром от 10 до 50 *мм*. Обмотка катушки $L_2$ составляет 20—30 витков, катушки $L_1$—5—8 витков, а катушки $L_3$ до сотни витков в зависимости от требующегося напряжения.

Двухтактный преобразователь напряжения более устойчив в работе, прост в наладке и имеет меньшую величину пульсации выходного напряжения. На рис. 20 приведена принципиальная схема

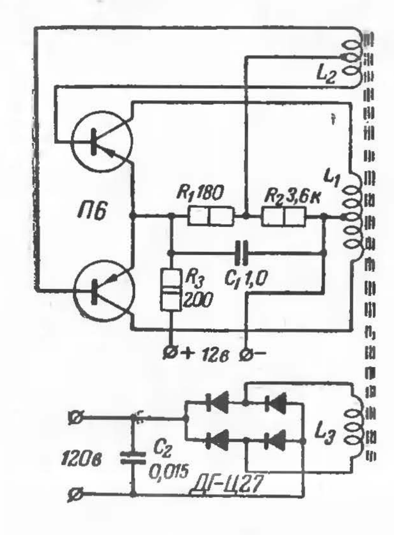



Рис. 20. Принципиальная схема двухтактного преобразователя напряжения.

двухтактного преобразователя напряжения с 12 на 120 *в* мощностью 1,5—2 *вт*. Сердечник трансформатора из феррита марки Ф-200 имеет наружный диаметр 18,5 и внутренний 10 *мм*. Число витков обмоток: $L_1$—2×20, $L_2$—2×6 и $L_3$ — 180; к. п. д. преобразователя 60%.

Трансформаторы преобразователей напряжений могут быть намотаны также и на Ш-образных сердечниках (Ш-7, Ш-12, Ш-17 и Ш-20).

Описанные преобразователи напряжений применяются в автомобильных, портативных ламповых приемниках и в переносных радио-



станциях, питаемых от низковольтных источников постоянного напряжения.

**Антенные трансформаторы.** Преимуществом применения ферритовых сердечников в антенных трансформаторах КВ и УКВ диапазонов являются высокая степень связи между обмотками и малые индуктивности рассеяния. Это увеличивает диапазон рабочих частот трансформаторов.

Антенные трансформаторы осуществляют трансформацию (согласование) сопротивлений в пределах 1 : 1—1 : 4, причем величина трансформируемого сопротивления обычно невелика (от нескольких десятков до сотен ом). Такие трансформаторы применяются также для симметрирования антенных устройств — перехода симметричных антенн на несимметричный (коаксиальный) кабель, и наоборот.

Магнитные потери сердечников благодаря малому значению трансформируемого сопротивления обычно незначительно влияют на характеристики трансформатора даже за пределами граничной частоты. Это дает возможность использовать в трансформаторах ферритовые сердечники, частотный диапазон которых значительно ниже

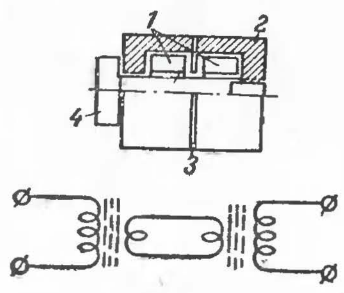



Рис. 21. Трансформатор с индуктивным шлейфом.

*1* — ферритовые торы; *2* — корпус; *3* — экран; *4* — стяжной болт.

рабочего. Так, например, в коротковолновом диапазоне (до 30 *Мгц*) с успехом применяются тороидальные сердечники марок Ф-600 и Ф-1000. В диапазоне УКВ (до 100 *Мгц*) наилучшие результаты дают ферриты марок НЦ-250, Ф-400 и Ф-600. Применение ферритов с большой проницаемостью оказывается полезным еще и вследствие наличия у них падающего участка в частотной характеристике магнитной проницаемости — уменьшения $\mu$ с увеличением частоты за пределами граничной частоты, что предотвращает рост паразитных реактивных сопротивлений. Наличие переменной по частоте магнитной проницаемости способствует увеличению диапазона работы трансформаторов.

Конструкции антенных трансформаторов весьма разнообразны. Одна из них приведена на рис. 21. Первичная и вторичная обмотки выполняются раздельно на двух торах, индуктивно объединяемых при помощи шлейфа — корпуса трансформатора, образующего объ-

емный виток. Для уменьшения влияния емкостной связи между обмотками торов устанавливается экранирующая шайба.

Положительным свойством трансформаторов с индуктивным шлейфом является принципиальная возможность добиваться любых коэффициентов передачи путем соответствующего выбора размеров торов. Наилучшие результаты в диапазоне УКВ при прочих равных условиях дают сердечники с отношением $r_н/r_в$, близким к единице (1,2—1,4). При расчете трансформаторов следует помнить, что наличие шлейфа уменьшает вдвое индуктивность обмотки.

Разновидностью антенного трансформатора является устройство, осуществляющее индуктивную связь антенны с фидером при помощи тороидального сердечника, надеваемого на антенну. В этом случае антенна служит первичной обмоткой трансформатора, а в качестве вторичной обмотки используются один-два витка, намотанных

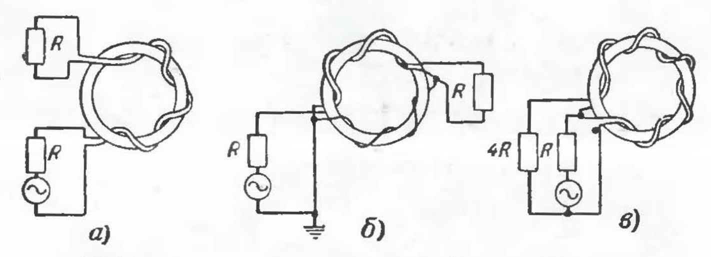



Рис. 22. Принципиальные схемы трансформаторов, использующих принцип длинной линии.

на сердечник и присоединяемых к фидеру. В качестве материала сердечника целесообразно использовать ферриты марки Ф-600 для ультракоротких волн.

Такие трансформаторы могут быть использованы для проверки качества симметрирующих элементов. Для этого тороидальный сердечник с намотанными на него витками надевают на коаксиальный кабель, а к его обмотке подключают простейший индикатор, например микроамперметр, включаемый через детектор. Питая антенну от генератора достаточной мощности, следует сопоставить величину тока, подающегося в антенну, и тока на внешней оболочке кабеля. Поскольку ток на оболочке может изменяться по длине кабеля, следует убедиться, что индикатор не включен в узел тока.

Интересны трансформаторы на ферритах, представляющие собой сочетание длинной линии и идеального трансформатора. Принцип действия такого трансформатора поясняется на рис. 22,*а*. Обмотки трансформатора, образующие длинную линию, намотаны бифилярно, что обеспечивает коэффициент передачи близкий к единице в широком диапазоне частот (от 100 *кгц* до сотен мегагерц). В этом трансформаторе фаза колебания, поданного на вход, может быть повернута на 180° путем выбора точки заземления на выходе. Достоинством указанного трансформатора является также независимость его параметров от тока подмагничивания и амплитудной нестабильности ферритов.



В таких трансформаторах обычно применяют ферритовые сердечники с высокой начальной проницаемостью, что позволяет использовать в диапазоне радиочастот падающий участок частотной характеристики магнитной проницаемости. В этом случае ферритовый сердечник трансформатора является средой, изменяющей параметры длинной линии в сторону улучшения передачи энергии.

Особенностью рассмотренных трансформаторов являются простота изготовления и малые размеры. Так, например, симметрирующий трансформатор (рис. 22,*б*) для диапазона частот 20—100 *Мгц* изготовляется на кольцах с внешним диаметром 12,5 *мм*. Он состоит

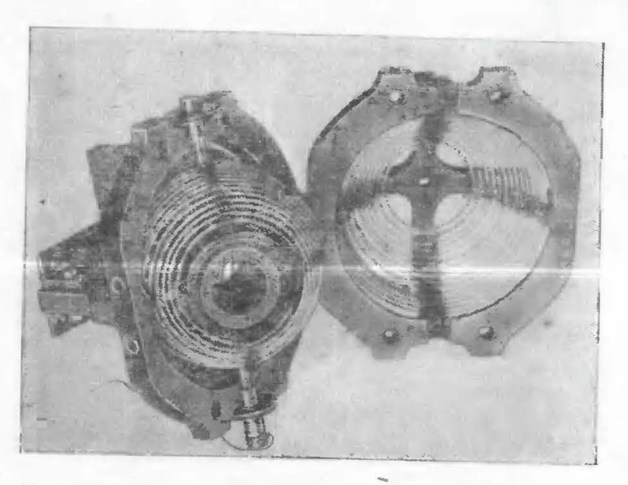


Рис. 23. Внешний вид антенного вариометра с ферритовыми сердечниками.

из трех-четырех витков обмотки, намотанной бифилярно, и такого же количества витков симметрирующей обмотки. Материал сердечника — феррит марки Ф-600 или Ф-400. Для обмотки используется литцендрат 7×0,1, расстояние между проводами бифилярной обмотки берется минимальным и строго выдерживается по всей длине кольца. Подобный трансформатор обеспечивает коэффициент симметрии от 100 до 15—20.

Хорошие результаты дает трансформатор сопротивлений 1 : 4, показанный на рис. 22,*в*. Он состоит из пяти витков бифилярной обмотки, аналогичной обмотке вышеописанного трансформатора. Применяя в этом трансформаторе тороидальные сердечники из феррита Ф-1000 или Ф-600 с внешним диаметром 10—20 *мм*, удается получить высокую точность трансформации сопротивлений (и напряжений) в диапазоне частот 1—50 *Мгц*.

**Антенный вариометр.** Для настройки антенного контура применяют различные типы вариометров. С точки зрения получения максимальных перекрытий среди концентрических вариометров наилучшим является шаровой вариометр (рис. 23). Максимальное значение

коэффициента перекрытия получается при равенстве индуктивностей статора и ротора. Однако, как правило, индуктивность роторной катушки меньше, так как геометрические размеры ее меньше статорной.

С введением сердечника индуктивность статора увеличивается значительно меньше, чем ротора (из-за большего зазора между обмоткой статора и сердечником и экранирующего действия роторной обмотки). Поэтому индуктивности роторной и статорной катушек

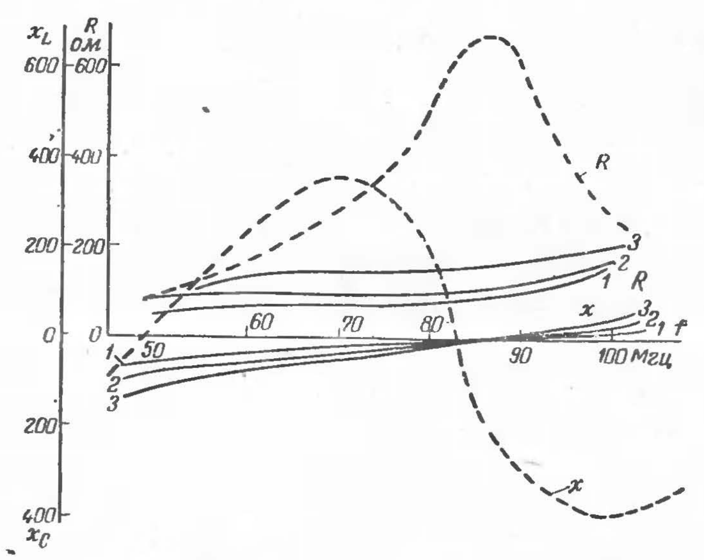



Рис. 24. Кривые входных сопротивлений обычного полуволнового диполя (штриховые линии) и диполя с ферритовыми кольцами (сплошные линии).

становятся близкими и коэффициент связи увеличивается, а вследствие этого повышается и коэффициент перекрытия.

Таким образом, применение ферритовых сердечников в вариометрах антенных контуров резко повышает их перекрытие и увеличивает максимальное значение индуктивности без существенного ухудшения добротности.

**Широкодиапазонная телевизионная антенна.** Применение ферритов позволяет расширить диапазон частот приемных антенн. С изменением частоты принимаемых сигналов входное сопротивление обычной антенны (при постоянной ее длине) также изменяется. Вследствие этого ухудшается передача энергии через фидер, т. е. нарушается согласование антенны с фидером.

При приеме телевизионных сигналов антенна соединяется с телевизором длинным фидером, поэтому при отсутствии согласования антенны с фидером, помимо уменьшения уровня сигнала на входе телевизора, на его экране может возникнуть несколько сдвинутых изображений. При настройке антенны на сигнал первой программы



(длина диполя около 3 *м*) ее входное сопротивление близко к 75 *ом* и хорошо согласуется с высокочастотным кабелем, волновое сопротивление которого также равно 75 *ом*. При приеме этой же антенной сигнала второй программы входное сопротивление ее составляет примерно 400—600 *ом* (в зависимости от диаметра полудиполей), что приводит к нарушению согласования.

Расчеты показывают, что, применяя обычную антенну в диапазоне частот 50—100 *Мгц*, трудно получить значения коэффициента бегущей волны на крайних частотах диапазона больше чем 0,2—0,25. На рис. 24 пунктиром показано изменение активного и реактивного сопротивлений диполя длиной 3 *м* в диапазоне частот 50—100 *Мгц*.

Применение в качестве компенсирующего элемента ферритовых колец позволяет существенно уменьшить реактивное сопротивление антенны на концах диапазона и в то же время выравнить активное сопротивление диполя. Ферритовое кольцо, надетое на полудиполь антенны, резко увеличивает индуктивность, что позволяет ском-

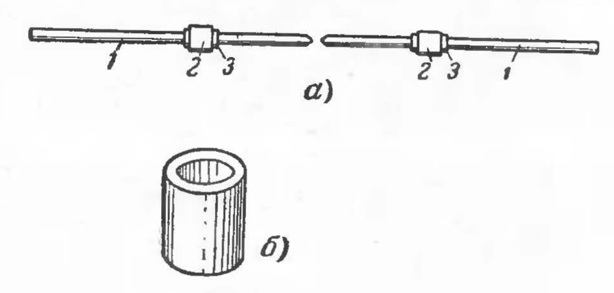



Рис. 25. Конструкция широкополосной телевизионной антенны.

*а* — антенна в сборе (*1* — полудиполь, *2* — ферритовые цилиндры, *3* — резиновая шайба); *б* — компенсирующее кольцо.

пенсировать емкостное сопротивление. При этом правильный выбор марки феррита обеспечивает изменение индуктивности антенны с частотой в желаемом направлении (величина индуктивности уменьшается с увеличением частоты). Наличие магнитных потерь также помогает обеспечить постоянство активного сопротивления антенны в данном диапазоне частот.

Расположение компенсирующих ферритовых колец и их размеры существенно влияют на величину входного сопротивления антенны. В результате экспериментов были выбраны следующие размеры и марки ферритового элемента для антенны, входное сопротивление которой показано на рис. 24 сплошными линиями: наружный диаметр 28 *мм;* внутренний диаметр 18 *мм;* высота 25 *мм*; феррит Ф-1000 или Ф-600 (в последнем случае высота кольца должна быть увеличена до 30 *мм*), длина полудиполя 85 *см*.

В зависимости от требующейся величины активного сопротивления расстояния от концов полудиполя выбирались в 250 *мм* (кривые *1*), 500 *мм* (кривые *2*) и 700 *мм* (кривые *3*). Коэффициент бегущей волны оказался не хуже 0,6—0,65.

Ферритовые кольца укрепляются при помощи резиновых шайб, плотно насаженных на алюминиевые трубки полудиполей. Конструкция такой антенны показана на рис. 25.

**Генератор с магнитной перестройкой частоты.** Наличие у ферритов резко выраженной зависимости магнитной проницаемости от величины постоянного намагничивающего поля позволяет применять принципиально новые схемы управления частотой генератора. Учитывая невысокую стабильность ферритов, наиболее целесообразно

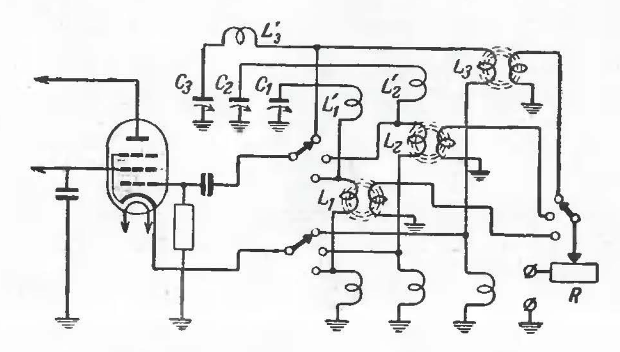



Рис. 26. Схема генератора с магнитной перестройкой частоты.

подобную настройку применять в схемах автоподстройки и генераторах качающейся частоты. На рис. 26 приведена принципиальная схема системы перестройки частоты гетеродина растянутых коротковолновых поддиапазонов радиоприемника.

Применение магнитной настройки для указанных поддиапазонов желательно потому, что позволяет избежать усложнения схемы на диапазонах с большим перекрытием ввиду требующегося сопряжения контура гетеродина с контурами входных каскадов радиоприемника. Схема магнитной настройки позволяет относительно просто производить настройку приемника с вынесенного пульта управления.

При магнитной настройке конденсатор переменной емкости отключается от контура гетеродина (вместо него включается один из конденсаторов $C_1 — C_3$ емкостью 10—15 *пф*) и управление частотой гетеродина производится путем изменения величины тока в цепи подмагничивания катушек индуктивности $L_1$—$L_3$, которые соединены с основными контурными катушками $L'_1$—$L'_3$. Ток подмагничивания регулируется переменным сопротивлением $R$ в пределах 20—250 *ма*.

Индуктивность катушек контуров магнитной настройки выбирается такой (обычно 30—60% от общей индуктивности), чтобы не ухудшить значительно добротность и стабильность контура гетеродина. Размеры и материал сердечника, а также число витков катушек выбираются в зависимости от диапазона работы гетеродина. Так, для катушки индуктивности $L_1$, предназначенной для диапазона волн 25—32 *м*, используются сердечники из феррита Ф-100 размерами: $d_н$ =22 *мм*, $d_в$ = 11 *мм*, $h$-5,5 *мм*. Для катушек $L_2$ и $L_3$ применяются сердечники из феррита Ф-400 размерами: $d_н$ = 20 *мм*, $d_в$ = 10 *мм*, $h$=5 *мм*. Индуктивность катушки $L_1$=4 *мкгн*, $L_2$= = 11 *мкгн* и $L_3$=30 *мкгн*.



Конструктивно катушки индуктивности контуров гетеродина и катушки подмагничивания выполняют так, чтобы исключить взаимную связь между ними. Для этого катушку индуктивности гетеродина наматывают на двух торах, причем направления обмоток катушек на каждом торе противоположны. Затем обе катушки соединяют параллельно или последовательно (в зависимости от требующейся величины индуктивности). Так, катушки $L_1$ и $L_2$ состоят из двух параллельно включенных обмоток по 10 витков в каждой, а катушка $L_3$ — из двух последовательно включенных таких же обмоток.

Катушку подмагничивания наматывают на оба тора, сложенные вместе. Число витков катушки выбирают в зависимости от мощности источника тока подмагничивания. В рассматриваемой схеме число витков принималось равным 100, при этом для осуществления необходимого перекрытия поддиапазона ток через катушку изменялся в следующих пределах: от 250 до 50 *ма* для катушки $L_1$; от 5 до 50 *ма* для катушки $L_2$ и от 10 до 50 *ма* для катушки $L_3$.

**Ферритовые антенны.** Компактность ферритовых антенн, малая зависимость их параметров от окружающей среды (исключая ферромагнитные предметы) и, наконец, пространственная избирательность послужили причиной широкого внедрения их в современные радиоприемные устройства.

Катушки ферритовых антенн существенно отличаются как по назначению, так и по своему конструктивному оформлению от ранее описанных высокочастотных дросселей.

Сердечники для антенн, выпускаемые нашей промышленностью, могут иметь прямоугольное и круглое сечение. Сердечники с прямоугольным сечением (пластинчатые), вследствие их меньшей длины, наиболее целесообразно применять в приемниках переносного типа (карманных).

В зависимости от назначения антенны — рабочего диапазона приемника, сердечники могут иметь различную магнитную проницаемость.

В диапазоне длинных волн наиболее широкое применение получили сердечники с магнитной проницаемостью от 200 до 600 *гс/э* в диапазоне средних волн — от 600 до 400 *гс/э*, в диапазоне коротких волн — от 400 до 100 *гс/э* и, наконец, в диапазоне УКВ — от 50 до 15 *гс/э*.

Широкая область применения ферритовых антенн потребовала также известного разнообразия типо-размеров сердечников, приведенных в табл. 8.

Данные добротности в табл. 8 приведены только для эталонных катушек указанной индуктивности при однорядной намотке, выполненной многожильным проводом ЛЭШО 21×0,07 и расположения катушки в средней части сердечника. При постоянной индуктивности эталонной катушки и диаметре сердечника 8 *мм*, изготовленного из феррита с проницаемостью $\mu$ =600 (диаметр катушки 9,5 *мм*) число витков эталонной катушки зависит от длины сердечника ($l_c$) и составляет: при $l_c$ =65 *мм* — 86 витков, при $l_c$ =80 *мм* — 81 виток, при $l_c$ =140 *мм* — 69 витков, при $l_c$=160 *мм* — 67 витков. Эти дан-

Таблица 8

| Рабочий диапазон частот, *Мгц* | Добротность не менее | Частота (измеренная), *Мгц* | Индуктивность эталонной катушки с сердечником, *мкгн* | Магнитная проницаемость, $\mu_0$ | Размеры сердечников *мм* | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Стержни | | Пластины | |
| | | | | | Диаметр | Длина | Сечение | Длина |
| 0,05÷0,35 | 120 | 0,35 | 4100±20% | 2 000 | 8<br>—<br>8<br>— | 60<br>—<br>100<br>— | —<br>16×4<br>16×4<br>20×3 | —<br>80<br>100<br>100 |
| 0,15÷1,6 | 120 | 1,5 | 350±20% | 600 | 8<br>8<br>8<br>8<br>— | 60<br>65<br>80<br>100<br>— | —<br>—<br>16×4<br>16×4<br>20×3 | —<br>—<br>80<br>100<br>100 |
| — | 150 | — | — | 400 | —<br>8<br>—<br>8<br>8<br>10 | —<br>125<br>—<br>140<br>160<br>200 | 20×3<br>16×4<br>20×3<br>—<br>25×5<br>25×5 | 115<br>125<br>125<br>—<br>160<br>200 |
| 4÷12 | 100 | 12 | 5,2±20% | 200 | 8<br>8<br>10 | 125<br>160<br>200 | —<br>25×5<br>— | —<br>160<br>— |
| 6÷18 | 140 | 18 | 2,2±20% | 100 | 8<br>8<br>10 | 125<br>160<br>200 | —<br>25×5<br>— | —<br>160<br>— |
| 18÷30 | 100 | 30 | 0,8±20% | 50 | 8<br>10 | 160<br>200 | —<br>— | —<br>— |
| 40÷100 | 200 | 70 | 0,09±20% | 20 | 8<br>10 | 160<br>200 | —<br>— | —<br>— |

ные позволяют примерно определить требуемое число витков антенной катушки при любой другой индуктивности.

Наиболее просто примерный подсчет числа витков может быть произведен для сердечников тех же конфигураций, что и применяемые в эталонных катушках. Тогда, требуемое число витков антенной катушки определяется как значение корня квадратного из отношения индуктивностей рассчитываемой и эталонной катушек, умноженное на 1,1.

При другом диаметре сердечника отношение под корнем умножается на отношение диаметров. При изменении марки ферритового сердечника целесообразно пользоваться графиками, приведенными на рис. 5 и 6 и формулой — на стр. 13.

С целью увеличения эффективности приемных ферритовых антенн может быть применено параллельное или последовательное включение антенных катушек, размещенных на отдельных сердечниках.

При параллельном включении общая индуктивность ферритовой антенны уменьшается в число раз, приблизительно равное числу одиночных антенн, что позволяет увеличить число витков в каждой из антенных катушек, а, следовательно, и эффективность антенны. Так, при параллельном включении трех антенн число витков может быть увеличено в $\sqrt{3}$ раз.



## ЛИТЕРАТУРА

Рабкин Л. И., Шольц Н. Н., Магнитодиэлектрики и феррокатушки, Связьиздат, 1948.

Поливанов К. М., Ферромагнетики, Госэнергоиздат, 1957.

Матвеев Г. А., Хомич В. И., Ферриты — новые магнитные материалы, «Радио», 1959, № 8.

Хомич В. И., Приемные ферритовые антенны, Госэнергоиздат, 1960.

Ферриты, изд. АН БССР, Минск, 1960.

Рабкин Л. И., Высокочастотные ферромагнетики, Физматгиз, 1960.